

УДК 681.58

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАНОСЕКУНДНЫМ УСКОРИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

Жуков Л.Л., Егоров И.С., Полосков А.В., Ежов В.В.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: egoris@tpu.ru

Рассмотрены особенности системы управления импульсным ускорителем электронов АСТРА-М. Одноблочная концепция построения ускорителя подразумевает гальванически связанные корпуса силовой цепи (импульсы напряжения до 450 кВ, импульсы тока до 10 кА) и низковольтной части (5–12 В). Работа ускорителя с частотой повторения до 100 имп./с сопровождается распространением помех микросекундной и наносекундной длительности. Описан способ организации системы управления, состоящей из головного контроллера и удалённого модуля интерфейса управления. Рассмотрен эксплуатационный опыт обеспечения электромагнитной совместимости оборудования разных классов напряжения и отказоустойчивости при воздействии внешних и внутренних факторов нарушения работы оборудования. Система управления ускорителем была испытана как при самостоятельной работе ускорителя, так и при работе в составе технологической линии.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, помехозащита, микроконтроллерная система управления

FEATURES OF STRUCTURE AND OPERATION OF CONTROL SYSTEM FOR NANOSECOND ELECTRON ACCELERATOR

Zhukov L.L., Egorov I.S., Poloskov A.V., Ezhov V.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: egoris@tpu.ru

Features of control system building were studied for the ASTRA-M pulsed electron accelerator. The single part philosophy of the accelerator setup implies galvanic connection between power circuit cases (up to 450 kV of pulsed voltage and up to 10 kA of pulsed current) and low voltage parts (5–12 V). Operation of the accelerator with the pulse repetition rate of up to 100 pps accompanied by disturbances of microsecond and nanosecond duration. Paper describes structure of the control system, which consist of head controller and remote control module. The experience of operation is considered in insuring of electromagnetic compatibility of different voltage grades equipment. The control system was successfully tested for independent mode as well as for integrated to processing line mode.

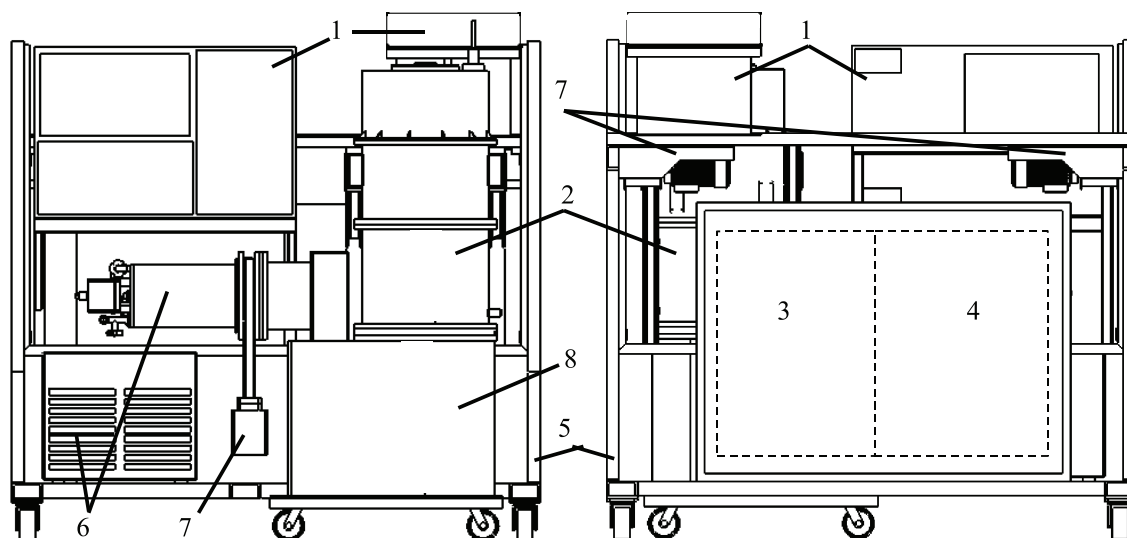
Keywords: electromagnetic compatibility, noise immunity, microcontroller system

Объективным требованием к современному оборудованию, предполагающему практическое использование, является автоматизация его применения на уровне, достаточном для интеграции в существующие технологические линии [8]. Особого, гибкого подхода требует автоматизация уникального оборудования, традиционно производимого и обслуживаемого научными организациями [9]. Примером такого оборудования являются ускорители заряженных частиц – уникального инструмента для очистки и обеззараживания, обработки и модификации поверхностей твёрдых тел, объёмов жидкостей и газов [4, 5, 7, 11, 14, 15]. Активное применение импульсных ускорителей прямого действия в производстве и медицине сдерживается сложностью изготовления и обслуживания генераторов импульсов ускоряющего напряжения (как правило, с энергией электронов 0,1–6 МэВ). В настоящее время появление промышленно выпускаемых коммутаторов высокого класса напряжения [10] дало возможность построения относительно простых и надёжных трансформаторных схем

генераторов [12, 13] с высокими эксплуатационными характеристиками, позволяющих генерировать импульсы напряжения длительностью 100–500 нс амплитудой 300–450 кВ [1, 3]. Импульсы прикладываются к электронному диоду, который преобразует их в энергию электронов пучка. Для обеспечения электрической прочности диода используется изолятор в вакууме ($2\text{--}5 \cdot 10^{-5}$ Торр). Особенности построения системы управления такого ускорителя, произведённого в стенах Томского политехнического университета, посвящена данная работа.

Конструктивные особенности объекта управления

Исходя из условий компактности и мобильности установки, всё силовое оборудование ускорителя размещено в единой стойке (рис. 1), за исключением ряда исполнительных элементов периферийных вспомогательных систем, выносных датчиков сопряжения с технологической линией и системами обеспечения безопасности персонала [12].



*Рис. 1. Размещение подсистем ускорителя в единой станции:
 1 – источник импульсного электропитания; 2 – генератор высоковольтных импульсов
 в заземлённом корпусе; 3 – отсек первичного электропитания;
 4 – отсек контроллера, логических и диагностических цепей;
 5 – мобильная единая станция; 6 – высоковакуумный криогенный насос с гелиевым компрессором;
 7 – высоковакуумный затвор; 8 – съёмный кожух местной биологической защиты*

Станция 5 выполнена из элементов стандартного металлопроката, соединена отдельным проводником с заземляющей шиной. Заземлённый отдельным проводником корпус 2 является токоведущей частью второй ступени повышения напряжения в силовой цепи генератора высоковольтных импульсов [2]. При протекающем импульсном токе ~ 10 кА и длительности $\sim 0,5$ мкс разница потенциалов между нижней точкой заземления и верхней точкой крепления к станции достигает 100 В. Данный импульс распространяется на прочие, гальванически связанные элементы силовой цепи и является паразитным. В верхней части генератора высоковольтных импульсов 2 располагается основной выключатель, кроме синхронизованных запускающих импульсов 4–6 кВ 3 мкс, питания (6 В постоянного напряжения) и защиты от помех генератора и поглотителя водорода [2].

К обязательным контролируемым условиям работы установки относятся: отсутствие людей в помещении размещения ускорителя, установленный кожух съёмной местной биологической защиты 8 и закрытые дверцы шкафов первичного 3, 4 и импульсного 1 электропитания. Отдельного внимания требует соблюдение корректности процедур запуска, вывода на режим и остановка системы подготовки вакуума 6, особенно в случаях аварийного останова и при

пропадании напряжения в сети. Давление остаточной атмосферы в вакуумном объёме электронного диода ускорителя с этой целью должно непрерывно контролироваться. Прочие датчики могут определяться технологическими требованиями линии, в составе которой работает ускоритель, либо предельными ограничениями режимов работы оборудования, как, например, температура трансформаторного масла в корпусе генератора или температура тиристорных сборок источника импульсного электропитания. Данные характеристики требуется учитывать только при длительных режимах работы при высокой частоте следования импульсов (крейсерский режим 40 имп./с).

Требуется также, чтобы в качестве удалённого интерфейса управления возможно было использование ПК с соответствующим программным обеспечением и возможностью «горячего» подключения/отключения к системе.

С учётом описанных условий успешной эксплуатации ускорителя была разработана система управления, описанная ниже.

Структура системы управления ускорителем

Использование отдельно стоящей панели оператора с возможностью её отключения в процессе работы установки предполагает расположение головного контроллера на станции ускорителя. Для связи

удалённого интерфейса и головного контроля предусмотрена протяжённая помехозащищённая линия передачи данных, выполненная на основе оптоволоконной линии с преобразователями Ethernet для обеспечения совместимости с разъёмами стандартных сетевых плат ПК. Упрощённая топология системы управления и взаимодействия её элементов представлена на рис. 2.

Основным средством управления оборудованием является интерактивная мнемосхема панели оператора с интуитивно понятным интерфейсом (рис. 3), реализованная на графической платформе программной среды Master Scada, установленной на компьютере с операционной системой Windows. В качестве примера представлена мнемосхема линии про-

точной обработки жидкостей электронным пучком. Интерфейс имеет несколько уровней доступа с различными полномочиями оператора и может быть легко перестроен под текущие прикладные задачи ускорителя.

Мнемосхема содержит информацию о текущем состоянии элементов установки. При нажатии на изображение элемента появляется всплывающее окно с возможностью выбора действия при текущем уровне доступа. В условиях максимальных полномочий оператора (ручной режим) неисправность некоторых элементов схемы или их отсутствие можно игнорировать, отключив соответствующий тип блокировки. В этом случае оператор определяет возможность безаварийной работы.

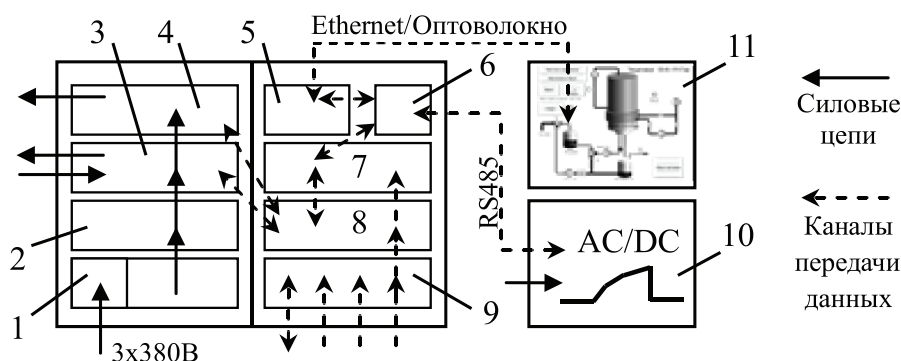


Рис. 2. Элементная схема системы управления ускорителем:

1 – вводной автомат и шина первичного электропитания; 2 – блок автоматических выключателей; 3 – аппаратные блокировки включения силовых цепей; 4 – пускатели силовой цепи и периферийного оборудования; 5 – модуль преобразователя оптика/Ethernet; 6 – контроллер Segnetix; 7 – модули расширения; 8 – блок реле; 9 – блок опроса датчиков; 10 – источник импульсного электропитания; 11 – панель оператора

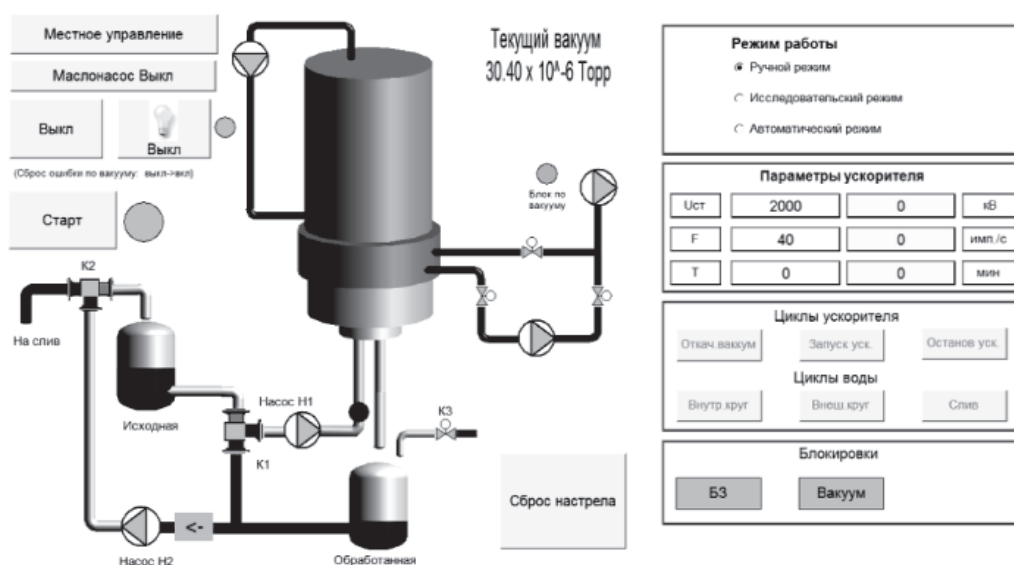


Рис. 3. Вид мнемосхемы панели оператора при работе ускорителя в составе линии обработки жидкостей

Системой управления реализован исследовательский режим, который позволяет автоматически выполнять отдельные технологические циклы операций: набрать жидкость в ёмкость, подготовить требуемый вакуум, произвести процедуру запуска/останова ускорителя. Полностью автоматический режим в описанном примере отслеживает уровень жидкости в исходной ёмкости и при её наполнении запускает обработку. Обработанная жидкость накапливается в приёмной ёмкости и при её наполнении отправляется на последующую обработку. После активации автоматического режима работы панель оператора может быть отключена – работа ускорителя продолжится под управлением головного контроллера. Для аварийного отключения установки на месте расположения оператора предусмотрена невозвратная кнопка, аппаратно размыкающая силовую часть цепи питания. Опыт эксплуатации реализованной системы управления привёл к доработкам, описанным ниже.

Особенности эксплуатации системы управления импульсным электронным ускорителем

Важной особенностью работы импульсного ускорителя является короткая длительность генерируемых импульсов тока и напряжения. Субмикросекундные импульсы большой амплитуды создают неблагоприятные условия работы низковольтного полупроводникового оборудования и требуют кропотливого подхода к электромагнитной совместимости систем разного класса напряжения. Так, например, источник импульсного напряжения оперирует полупроводниковым ключом – тиристором для формирования импульсов заряда первичной ёмкости [12] длительностью 100 мкс. Канал управления тиристором – оптический. Драйвер тиристора использует входящий оптический сигнал для формирования электрического импульса нормируемой величины и полярности для открытия тиристора. Однако, как уже указывалось ранее, при последующем срабатывании генератора высоковольтных импульсов по заземлённому корпусу и станине распространялся импульс помехи, который формировал в пусковых цепях тиристора сигнал, по параметрам и полярности близкий запускающему. Данный факт мешал своевременному закрытию тиристора после успешного процесса зарядки либо приводил к ложному повторному открытию. Изоляция цепей запуска тиристора проблему не решала, так как один из электродов тиристора гальванически связан с корпусом. Неочевидным решением проблемы стало изменение полярности импульса помехи – инвертирование полярности

импульсного источника питания и направления намотки импульсных трансформаторов. Таким образом, короткоимпульсная помеха, формируя запирающие импульсы в цепи драйвера тиристора, положительно повлияла на устойчивость работы полупроводникового источника первичного электропитания.

В ряде случаев были зафиксированы сбои в работе USB интерфейса панели оператора, что могло привести к невозможности своевременно скорректировать режим работы установки. Решением стало применение панели оператора с функцией «тач-скрин», освобождая рабочее место оператора от излишних средств ввода информации.

Работа в условиях короткоимпульсной помехи потребовала также применения дополнительных способов защиты низковольтного оборудования установки. Так, отсек размещения контроллера и логических цепей представляет собой гальванически замкнутый контур, а все входящие подключения периферийных датчиков уровня, давления и расхода жидкости, датчиков температур и сухих контактов положения биологической защиты, закрытия дверей шкафов оборудованы ферритовыми фильтрами помех или заключены в экранирующие заземлённые металлические чулки.

Для защиты генератора и поглотителя водорода высоковольтного коммутатора от влияния импульсной помехи использовали способ, предложенный производителем прибора – высокочастотный фильтр на основе ёмкостных элементов, устанавливаемый непосредственно на вводах прибора. Промышленные фильтрующие элементы дополнительно применялись для защиты низковольтных реле от помех.

Применяемые насосы для перекачки жидкости имеют стандартную защиту от «сухого» хода, выполненную программным или аппаратным способом.

Особого внимания потребовала организация функционирования части оборудования, связанная с работой системы подготовки вакуума. Основа системы – высоковакуумный криогенный насос марки CryoTorr, криогенная головка которого обеспечивает температуру криопанелей порядка 15 К. Вывод криоголовки на рабочий режим (захолаживание) изготовитель рекомендует производить в объёме с минимальным натеканием, что можно обеспечить при отсечении крионасоса от рабочего объёма высоковакуумным затвором. В аналогичных условиях рекомендовано производить также вывод из рабочего режима и регенерацию криопанелей. Привод высоковакуумного затвора выполнен пневматическим, что при наличии внешнего ресивера и возвратного нормально открытого

пневмоклапана обеспечило автоматическое запертие затвора при пропадании напряжения в питающей сети. Герметичность вакуумной системы и достаточная глубина вакуума в процессе работы ускорителя определялась системой по показаниям широкодиапазонного вакуумметра марки Televac СС-10.

Степень автоматизации установки позволила реализовать мониторинг и регулировку параметров работы ускорителя через интернет.

Заключение

Описанная система управления импульсного электронного ускорителя, построенная по принципу головной контроллер – интерфейс удалённого управления, продемонстрировала возможность функционирования в условиях короткоимпульсной помехи, отказоустойчивость при разрыве связи между панелью оператора и ускорителем, достаточную глубину автоматизации для управления в удалённом режиме и в составе автоматической линии обработки жидкостей. Удобство управления и гибкость настройки описанной системы управления дают основания её применения для управления и другими наносекундными устройствами большой импульсной мощности.

Список литературы

1. Егоров И.С., Ежов В.В., Полосков А.В. Влияние запаздывания тока в вакуумном диоде электронного ускорителя на параметры формирования импульсов ускоряющего напряжения // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–11. – С. 2400–2404.
2. Егоров И.С., Есипов В.С., Луконин Е.И., Полосков А.В. Автозапуск тиратрона с холодным катодом в генераторе импульсного напряжения // *Приборы и техника эксперимента*. – 2015. № 1. – С. 63.
3. Егоров И.С. Оптимизация параметров электронного диода частотного сильноточного ускорителя // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=10819>.
4. Каиканов М.И., Ремнев Г.Е., Юдина Н.В., Егоров И.С., Лоскутова Ю.В. Исследование реологических свойств нефти при облучении импульсным сильноточным электронным пучком // *Известия вузов. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 6–2. – С. 37–42.
5. Мостовщиков А.В., Ильин А.П., Егоров И.С., Захарова М.А. Изменение термохимических параметров нанопорошка алюминия после облучения потоком ускоренных электронов // *Вестник Томского государственного университета. Химия*. – 2015. – № 2. – С. 6–13.
6. Ремнев Г.Е., Степанов А.В., Войно Д.А. и др. Очистка и стерилизация промышленно-бытовых сточных вод импульсным электронным пучком наносекундной длительности // *Ядерная и радиационная физика 8-я Международная конференция: доклады*. – Институт ядерной физики национального ядерного центра Республики Казахстан, 2011. – С. 506–509.
7. Ростов В.В., Алексеенко П.И., Выходцев П.В. и др. Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов прямого действия как средство стерилизации медицинских изделий однократного применения // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 48–54.
8. Шидловский С.В. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. – Томск, 2005. – 100 с.

9. Шидловский С.В., Сырякин В.И., Шидловский В.С. Перестраиваемые вычислительные среды в много-связных системах автоматического управления // *Телекоммуникации*. – 2010. – № 10. – С. 28–32.

10. Bochkov V., Bochkov D., Nicolaev V., Teryoshin V., Panov P., Batrakov A., Karlik K., Ozur G., Proskurovsky D. Development of compact high-voltage electronic vacuum devices // *Proceedings of the 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, IPMHVC 2012*. – 2012. – С. 664–667.

11. Egorov I.S., Kaikanov M.I., Kolokolov D.Yu. et al. Treatment of Industrial and Household Waste Water with the Pulse Electron Accelerator-Based Setup // *Известия вузов. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 10/3. – С. 61–64.

12. Egorov I., Esipov V., Remnev G. et al. A high-repetition rate pulsed electron accelerator // *Proceedings of the 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, IPMHVC 2012*. – 2012. – С. 716–719.

13. Egorov I.S., Remnev G.E., Kaikanov M.I. и др. Repetitive source of pulsed electron beams // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 10–3. – С. 58–60.

14. Kaikanov M.I., Egorov I.S. Effect of high current electron beam of nanosecond duration on n-decane // *Известия вузов. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 10–3. – С. 133–135.

15. Pikaev A.K. Contribution of radiation technology to environmental protection // *High Energy Chemistry*. – 2002. – Т. 36. – № 3. – С. 135–146.

References

1. Egorov I.S., Ezhov V.V., Poloskov A.V. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 11–11, pp. 2400–2404.
2. Egorov I.S., Esipov V.S., Lukonin E.I., Poloskov A.V. *Pribory i tehnika eksperimenta*, 2015, no. 1, pp. 63–66.
3. Egorov I.S. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 6, URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=10819>.
4. Kaikanov M.I., Remnev G.E., Yudina N.V. et al. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 6–2, pp. 37–42.
5. Mostovshnikov A.V., Ilin A.P., Egorov I.S. and Zaharova M.A. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya*, 2015, no. 2, pp. 6–13.
6. Remnev G.E., Stepanov A.V., Vojno D.A. i dr. *8-ya Mezhdunarodnaya konferencija «Jadernaja i radiacionnaja fizika»: doklady*. «Ochistka i sterilizacija promyshlenno-bytovykh stochnykh vod impulsnym jelektronnym puchkom nanosekundnoj dlitelnosti». Kazakhstan, 2011, pp. 506–509.
7. Rostov V.V., Alekseenko P.I., Vyhodcev P.V. et al. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 48–54.
8. Shidlovskiy S.V. *Avtomatizacija tehnologicheskikh processov i proizvodstv* [Automatisation of technological process and factoring]. Tomsk, NTL publ., 2005. 100 p.
9. Shidlovskiy S.V., Syryamkin V.I. and Shidlovskiy V.S. *Telekommunikacii*, 2008, no. 10, pp. 28–32.
10. Bochkov V., Bochkov D., Nicolaev V., Teryoshin V., Panov P., Batrakov A., Karlik K., Ozur G., Proskurovsky D. *Proceedings of the 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference IPMHVC 2012*. San Diego, 2012, pp. 664–667.
11. Egorov I.S., Kaikanov M.I., Kolokolov D.Yu. et al. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 10–3, pp. 61–64.
12. Egorov I., Esipov V., Remnev G., Kaikanov M., Lukonin E., Poloskov A. *Proceedings of the 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference IPMHVC 2012*. San Diego, 2012, pp. 716–719.
13. Egorov I.S., Remnev G.E., Kaikanov M.I. et al. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 10–3, pp. 58–60.
14. Kaikanov M.I., Egorov I.S. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 10–3, pp. 133–135.
15. Pikaev A.K. *High Energy Chemistry*, 2002, vol. 36, no. 3, pp. 135–146.